

## ゴマ (*Sesamum indicum* L.) のセサミンおよびセサモリン含量に関する ダイヤレル分析

大瀧直樹・加藤晶子

(農業・食品産業技術総合研究機構作物研究所)

**要旨：**国産ゴマの振興に向けて生産性の優れる高リグナン含有ゴマ品種の開発が求められている。その効率的、効果的な品種開発には、セサミンおよびセサモリン含量の遺伝性を解明することが有効である。本実験では、7種のゴマ遺伝資源を片側ダイヤレル交配したF<sub>1</sub>植物およびF<sub>2</sub>植物について圃場栽培を行い、稔実した種子のセサミンおよびセサモリン含量を分析し遺伝性を検討した。その結果、F<sub>1</sub>とF<sub>2</sub>のダイヤレル分析結果に大きな相違は認められず、*Vr/Wr* グラフの解析からセサミンおよびセサモリン含量にはエピスタシスの影響が無いと推定でき、相加・優性モデルが適合した。両含量ではともに相加分散が優性分散を上回り、平均優性度が0.58から0.88と部分優性であった。優性効果は、含量が少ない方向に作用した。狭義の遺伝率は0.859から0.903と推定され、ゴマの他形質と比較して高い値であった。セサミンおよびセサモリン含量の遺伝性は多くの点で一致し、また各世代のセサミン含量とセサモリン含量との間には統計的に有意な正の相関関係が認められたことから、両成分含量の多少は同じポリジーン系で制御されていると考えられた。一方、異なる花粉親によって受精させたF<sub>1</sub>種子のセサミンおよびセサモリン含量は、F<sub>1</sub>種子ではなく専ら種子親の遺伝子型に依存していた。以上のことから、セサミンおよびセサモリン含量がともに高い品種の開発には、初期世代から表現型に基づいた選抜育種が有効と考えられた。

**キーワード：**遺伝率、ゴマ、セサミン、セサモリン、相加分散、ダイヤレル分析、優性分散。

ゴマ (*Sesamum indicum* L.) は、種子に50%以上の脂質を含む油料作物として世界で広く栽培されている。日本は古くからゴマに親しみ、油として食用にする他に種子そのものを煎りゴマ、すりゴマなどに利用してきた。かつて日本では、ゴマは年間1万haにわたって栽培され、6千tを超える生産を記録していたが、ダイズの輸入自由化以降、その自給率は下降を続け(大豆供給安定協会1991)、現在では1%を下回っていると推定されている。このように、ゴマの年間需要16万から17万tのほとんどをアフリカ、南米、東南アジア諸国からの輸入に依存している。近年、ゴマの食品としての高い栄養性や優れた食味、リグナンを中心とした健康機能性の解明、さらには多様な食文化への志向により全世界的にゴマの消費量が向上している。同時に日本では国産ゴマへのニーズも高まっており、育成品種「ごまぞう」や「まるひめ」はリグナン含量が高く、世界的に希少なゴマとして取引されている。しかし、「ごまぞう」は熟期が遅く、病害に弱いこと、「まるひめ」は収量が少ないこと等が指摘され、生産性がより高い高リグナンゴマ品種の開発が産地、実需者から求められている。

ゴマの種子は種子重に対して0.8%から1%のリグナン類を含み、リグナンの中ではセサミノール、セサミン、セサモリンの3種で全リグナン含量の80%を占めている(並木ら2015)。ゴマリグナンの健康機能性に関して、セサミンは生体肝臓内の代謝等によりカテコール体に変換され、高い抗酸化活性を示すことが示唆されている(Nakaiら

2003)。一方、セサモリンは加熱分解などによりセサモールへ変換され、細胞内で高い酸化防御作用を発揮することが報告されている(Nair and Nair 2010)。リグナンは生体の脂質代謝へ影響し、セサミンは血清コレステロール濃度を低下、セサミンおよびセサモリンは血清トリグリコシドおよび肝臓コレステロール濃度を低下させることが報告されている(Ideら2009)。このようにセサミンおよびセサモリンの健康機能性には相違があるが、両者のリグナン構造は類似しており、セサモリンは、セサミンの一方のフェニル基がアセタール酸素架橋で結合している点だけが異なる(Beronza 1955)。

ゴマの種子成分の遺伝性について、小林(1977)は、種子の含油量やタンパク質含量は含量が少ない方、また、種皮の芳香性成分は多い方が優性であると報告している。勝田ら(2005)はゴマ遺伝資源650点のセサミンおよびセサモリン含量を測定した結果、両含量は遺伝資源の間で大きな差のあることを明らかにしている。安本(2008)は、セサミン含量の異なるゴマを正逆交配したF<sub>1</sub>のセサミン含量が、低セサミン含有親の値に近いことを報告している。勝田ら(2005)は、交配分離集団をセサモリン含量0.5 mg/gを境に区分すると、0.5 mg/g以上とそれ未満の頻度が3:1に適合することを報告し、山本ら(2014)は、F<sub>2</sub>およびF<sub>5</sub>の交配分離集団それぞれにおいてセサモリン含量が0.5 mg/gを境に、2グループに分かれることを報告している。このようにセサミンおよびセサモリン含量の遺

第1表 ゴマ片側ダイアレル交配による  $F_1$  植物のリグナン含量および優性度 (2013).

セサミン (mg/g)								
親系統	真瀬金	岩手黒	白滋賀	長瀨	ごまぞう	Korea39	H65	平均
真瀬金	3.56	0.72	2.84	3.17	5.30	3.90	6.36	3.71
岩手黒	-0.52	0.77	0.52	0.85	1.43	1.08	2.11	1.12
白滋賀	-0.06	-0.67	2.26	2.64	3.99	2.41	2.78	2.53
長瀨	-7.93	-0.47	-0.20	3.51	5.12	3.22	5.27	3.38
ごまぞう	-0.15	-0.42	-0.22	-0.18	8.53	4.39	7.44	4.61
Korea39	0.76	-0.29	7.67	0.27	-0.16	2.24	5.18	3.36
H65	0.04	-0.33	-0.42	-0.17	7.44	-0.05	8.76	4.86
優性度平均	-1.31	-0.45	1.02	-1.45	1.05	1.37	1.09	
セサモリン (mg/g)								
親系統	真瀬金	岩手黒	白滋賀	長瀨	ごまぞう	Korea39	H65	平均
真瀬金	2.42	0.88	2.27	2.12	3.10	2.50	3.25	2.35
岩手黒	-0.06	1.01	0.94	0.82	1.39	1.38	1.89	1.22
白滋賀	-0.84	-0.54	2.91	2.60	3.68	2.64	2.44	2.43
長瀨	-0.79	-0.66	0.07	2.19	2.59	2.47	3.22	2.30
ごまぞう	-0.04	-0.37	0.30	-0.26	3.87	3.07	3.61	2.91
Korea39	0.67	-0.11	0.22	1.73	0.08	1.96	3.01	2.51
H65	0.41	-0.12	-1.58	0.40	0.00	0.26	3.34	2.90
優性度平均	-0.11	-0.31	-0.40	0.09	-0.05	0.48	-0.11	

$F_1$  植物 :  $F_2$  種子. 表中, 対角線の枠内は親系統の含量, 対角線の上側は  $F_1$  の含量, 対角線の下側は  $F_1$  の優性度. 優性度 =  $F_1$  値 - (両親の平均値) / 両親間差の絶対値.

伝性の解明は進められてきたが, 相加・優性効果や遺伝率については明らかにされていない. 今後, 高リグナン品種を効率的, 効果的に改良するためには, これらの遺伝性を解明することが必要である. ダイアレル分析は, 自殖性植物において総当たり交配後代の分散成分から, 材料間の遺伝成分を解析する有効な手法である. そこで本試験では, 国内栽培が可能な7種のゴマ遺伝資源を交配した  $F_1$  および  $F_2$  植物を栽培実験し, 植物の種子に含まれるセサミンおよびセサモリン含量に関してダイアレル分析を行った.

### 材料と方法

供試材料には「真瀬金」(JP33955, JP はジーンバンク登録番号, 以下同じ), 「岩手黒」(JP84151), 「白滋賀」(JP33975), 「長瀨」(JP32274), 「Korea39」(JP81461), ジーンバンク未登録の「ごまぞう」および「H65」の7系統を交配親系統として用いた. 親系統は2012年に温室で養成し, 除雄の上, 総当たり交配(片側)を行い,  $F_1$  種子を採種した. これら  $F_1$  の21系統ならびに7親系統を2013年6月6日にセルトレイに播種し, 苗を7月2日に圃場移植した. 試験は作物研究所の観音台地区実験圃場を利用し, 実験区は, 1.1 m<sup>2</sup> の乱塊法3反復, 肥料は N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O = 4.8:7.2:4.8 kg/10a を全層施肥とし, 黒色ビニールマルチ (95 cm 幅, 穴径 5 cm の2列, 株間 15 cm, 列間 45 cm) による被覆栽培条件とした. 成熟に応じて実験区毎に採種し,  $F_1$  植物に稔実した種子 ( $F_2$  種子) をサンプルとして, セサミンおよ

びセサモリン含量を測定した. 2014年には, 前年度に採種した  $F_2$  種子3反復分を等量混合し, 親系統の種子とともに6月16日に圃場へ直播した. 実験区は2.2 m<sup>2</sup> の乱塊法3反復とし, その他の条件は2013年の実験と同一とした.  $F_2$  植物には熟期に個体間差が見られたので, 成熟に応じて個体別に収穫した. 収穫した個体別種子 ( $F_3$  種子) を反復毎に等量混合したものをサンプルとして, セサミンおよびセサモリン含量を分析した.

また, 上記のダイアレル交配とは別に, 種子親個体上の  $F_1$  種子におけるセサミンおよびセサモリン含量を明らかにするために, 花粉親の異なる  $F_1$  種子を調査した. 2015年に温室で鉢栽培した前記と同じ7親系統を除雄して種子親とし, それらとは異なる系統の花粉を交配して, 種子親に稔実した  $F_1$  種子をサンプルとした. 交配は, 花単位で2ないし3回行った.

各サンプルのセサミンおよびセサモリンの定量は, Shirato-Yasumoto (2003) の手法を一部改変して行った. サンプル種子20粒を重量測定した後に粉碎, 直後から80% (v/v) エタノールで12時間抽出し, 遠心分離 (3000 rpm, 10分間) した上清を HPLC システム (日本分光, UV2075, PU2080 および AS2055 で構成) にて分析した. HPLC の条件は移動相に80% (v/v) メタノール, カラムは「Crest pack C18S」(日本分光) を用い, 流速 1 mL/分, 波長 288 nm でセサミンおよびセサモリンを検出した. 分析は  $F_1$  ( $F_2$  種子) および  $F_2$  ( $F_3$  種子) サンプル毎に2回ずつ行い,

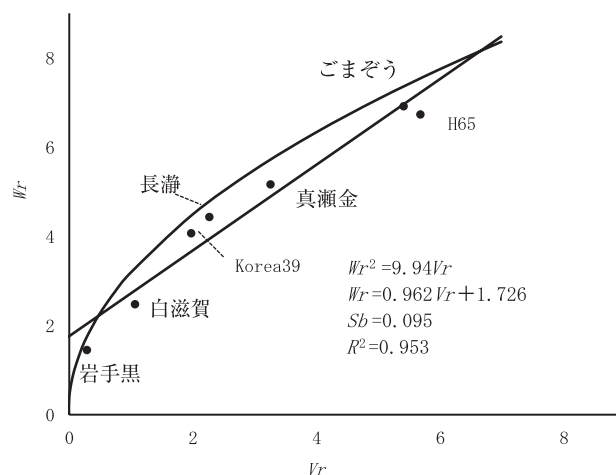
その平均値をゴマ種子 1g に対する含量 (mg/g) で表した。これら定量 (標準物質には長良サイエンス (株) のセサミンおよびセサモリンを使用) した  $F_1$  および  $F_2$  のサンプルのセサミンおよびセサモリン含量について、統計分析プログラム「DIALL」(鶴飼 1989) を用いてダイアル分析を行った。なお、 $F_1$  種子については交配毎に 1 回分析した。

## 結 果

### 1. $F_1$ におけるセサミンおよびセサモリンのダイアル分析 (2013)

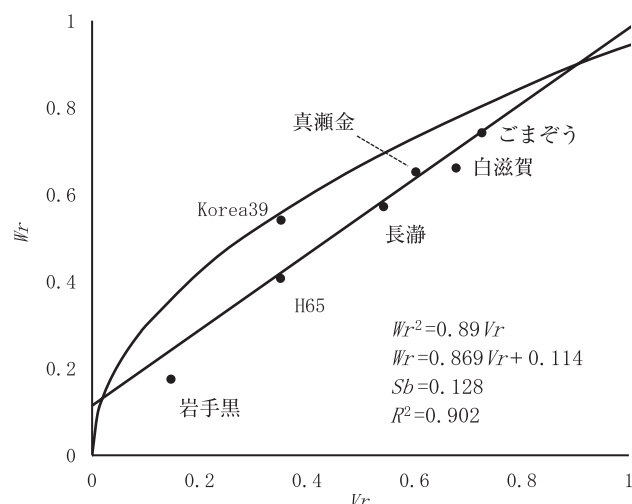
親系統および  $F_1$  のセサミン含量およびセサモリン含量を第 1 表に示す。セサミン含量では「岩手黒」が 0.77 mg/g で最も少なく、「ごまぞう」および「H65」がそれぞれ 8.53 mg/g, 8.76 mg/g と多かった。セサモリン含量では、「岩手黒」が 1.01 mg/g と少なく、「ごまぞう」および「H65」がそれぞれ 3.87 mg/g, 3.34 mg/g と多かった。親系統間の含量差は、セサミン含量の方がセサモリン含量より大きかった。 $F_1$  におけるセサミン含量は概して両親の中間に位置する組み合わせが多かった。このため  $F_1$  において優性度の絶対値が 1 を超える超優性を示したのは 3 組み合わせだけとなり、多くは優性度が負となる部分優性を示す組み合わせであった。 $F_1$  におけるセサモリン含量は、セサミン含量と同じく優性度の絶対値が 1 未満の部分優性が多かった。セサミン、セサモリン含量ともに「岩手黒」との  $F_1$  は負の、「Korea39」との  $F_1$  は正の優性度を示す場合が比較的多かった。

セサミンおよびセサモリン含量の  $Vr/Wr$  グラフを第 1 図、第 2 図にそれぞれ示す。セサミン含量の直線回帰係数は  $b=0.962$ 、回帰係数の標準誤差は  $Sb=0.095$ 、同じくセサモリン含量では、 $b=0.869$ 、 $Sb=0.128$  と、いずれも回帰係数 1 との有意差は認められないことから (第 2 表)、両形質にエピスタシスの影響は無く相加・優性モデルが適合すると考えられた。また、セサミン含量とセサモリン含量の回帰による寄与率はそれぞれ 0.953, 0.902 と高く、親系統における含量の差が遺伝的変異であることが明らかとなった。グラフ上の親系統の分布から、セサミン含量およびセサモリン含量ともに「岩手黒」が原点に近く分布しており、優性遺伝子の割合が高く、逆に「ごまぞう」は劣性遺伝子の割合が高いと考えられた。セサミン含量の  $(Vr+Wr)/Pr$  グラフを第 3 図に示す。セサミン含量に正の相関関係があったことから、数値の低い方、すなわち含量の低い方が優性であると考えられた。セサモリン含量の  $(Vr+Wr)/Pr$  グラフについても同様の結果であった (データ省略)。両含量に関する Walters and Morton (1978) によるダイアル分散分析結果を第 3 表に示す。相加効果を表す  $a$  項、優性効果を表す  $b$  項は、ともに統計的に有意となった。セサモリン含量では反復間差が 5% 水準で有意となった。次に両含量に関するダイアル分析により推定した各種遺伝パラメーターを、第 4 表に示す。セサミン含量では、



第 1 図 ゴマ片側ダイアル交配による  $F_1$  植物におけるセサミン含量の  $Vr/Wr$  グラフ (2013)。

$Vr$  は系列分散,  $Wr$  は系列と親の共分散,  $F_1$  植物:  $F_2$  種子。  
 $Sb$  は直線回帰係数の標準誤差,  $R^2$  は回帰直線による寄与率。



第 2 図 ゴマ片側ダイアル交配による  $F_1$  植物におけるセサモリン含量の  $Vr/Wr$  グラフ (2013)。

$Vr$  は系列分散,  $Wr$  は系列と親の共分散,  $F_1$  植物:  $F_2$  種子。  
 $Sb$  は直線回帰係数の標準誤差,  $R^2$  は回帰直線による寄与率。

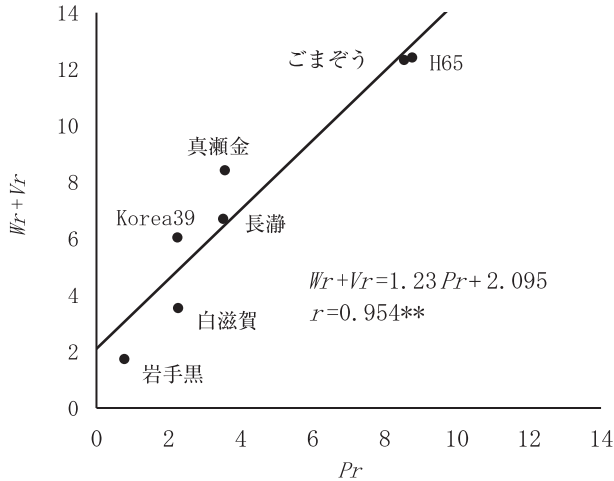
第 2 表 ゴマ片側ダイアル交配におけるセサミンおよびセサモリン含量に関する  $Wr/Vr$  グラフの直線回帰係数の有意性検定 (2013 および 2014 年)。

世代	形質	回帰係数	標準誤差	$t$ 値
$F_1$	セサミン含量	0.962	0.095	0.400
$F_2$	セサミン含量	0.692	0.127	2.425
$F_1$	セサモリン含量	0.869	0.128	1.023
$F_2$	セサモリン含量	0.833	0.122	1.369

$t$  値 = |回帰係数 - 1| / 標準誤差。各世代各形質において  $t$  値  $< t(5\%, \text{自由度 } 5)$  であるため 1 との有意差は無い。

相加分散が優性分散より大きく、広義の遺伝率は0.997、狭義の遺伝率は0.881と高かった。平均優性度は0.59と部分優性を示し、優性遺伝子の作用方向は-1.49と負であるため、セサミン含量の低い方向に作用した。セサモ

リン含量では、相加分散は優性分散より大きかったが、セサミン含量の場合より両者の差は小さかった。セサモリン含量の広義の遺伝率は0.996、狭義の遺伝率は0.862とともに高かった。平均優性度は0.88と、セサミン含量より高いが部分優性であり、その作用方向は-0.26と、セサモリン含量の低い方向に作用した。



第3図 ゴマ片側ダイアレル交配によるF<sub>1</sub>植物におけるセサミン含量の(Wr+Vr)/Prグラフ(2013)。

Vrは系列分散,Wrは系列と親の共分散,Prは親の値。F<sub>1</sub>植物:F<sub>2</sub>種子。\*\*は1%水準で統計的に有意。

## 2. F<sub>2</sub>におけるセサミンおよびセサモリンのダイアレル分析(2014)

親系統のセサミンおよびセサモリン含量を第5表に示す。セサミン含量は、「岩手黒」が少なく、「H65」および「ごまぞう」は多いものの、F<sub>1</sub>(2013年)よりやや少なかった。セサモリン含量では、「岩手黒」が少なく、「ごまぞう」および「H65」が多く、F<sub>1</sub>の結果とよく一致した。F<sub>2</sub>におけるセサミンおよびセサモリン含量の優性度は、両親の中間に位置する部分優性の組み合わせが多かった。これらF<sub>2</sub>の優性度の絶対値は、F<sub>1</sub>の結果より小さい組み合わせが多かった。「Korea39」とのF<sub>2</sub>は優性度が正となる組み合わせが比較的多かった。

F<sub>2</sub>ダイアレル分析によるセサミンおよびセサモリン含量のVr/Wrグラフを解析した結果、各系統の分布や直線回帰の傾向はF<sub>1</sub>における結果(第1図、第2図および第2表)と大きな相違点はなく、F<sub>2</sub>においてもエピスタシスの影響

第3表 ゴマ片側ダイアレル交配によるリグナン含量の分散分析。

項目	F <sub>1</sub> 植物(2013年)		F <sub>2</sub> 植物(2014年)	
	セサミン含量	セサモリン含量	セサミン含量	セサモリン含量
反復	0.87	3.63*	0.52	2.16
a項	512.88**	228.6**	735.36**	598.08**
b項	194.03**	188.36**	443.58**	393.77**
b <sub>1</sub>	202.99**	32.11**	6.9*	117.69**
b <sub>2</sub>	62.52**	64.71**	43.14**	75.19**
b <sub>3</sub>	249.76**	252.51**	646.5**	550.03**

Walters and Morton (1978)の手法により分散分析した結果。数値はF値を表す。F<sub>1</sub>植物:F<sub>2</sub>種子, F<sub>2</sub>植物:F<sub>3</sub>種子。a; 相加分散, b; 優性分散, b<sub>1</sub>; 平均優性分散, b<sub>2</sub>; 親の優性分散, b<sub>3</sub>; 優性分散の残差。\*, \*\*はそれぞれ5%, 1%水準で統計的に有意。

第4表 ゴマの片側ダイアレル交配によるリグナン含量の推定遺伝パラメーター。

項目	F <sub>1</sub> 植物(2013)		F <sub>2</sub> 植物(2014)	
	セサミン含量	セサモリン含量	セサミン含量	セサモリン含量
相加分散	9.94	0.89	3.77	0.92
優性分散	3.47	0.69	1.28	0.51
平均優性度	0.59	0.88	0.58	0.75
優性遺伝子の割合	0.59	0.38	0.37	0.41
有効因子数	1.08	0.17	0.02	0.29
優性効果方向	-1.49	-0.26	-0.14	-0.31
広義の遺伝率	0.997	0.996	0.998	0.998
狭義の遺伝率	0.881	0.862	0.903	0.859

統計ソフト「DIALL」(鵜飼 1989)により推定した遺伝パラメーター。F<sub>1</sub>植物:F<sub>2</sub>種子, F<sub>2</sub>植物:F<sub>3</sub>種子。



第5表 ゴマ片側ダイアレル交配による  $F_2$  植物のリグナン含量および優性度 (2014).

セサミン								
親系統	真瀬金	岩手黒	白滋賀	長瀬	ごまぞう	Korea39	H65	平均
真瀬金	3.47	1.50	3.39	2.67	4.54	3.23	5.91	3.54
岩手黒	-0.27	0.90	0.90	1.95	2.20	1.57	3.24	1.89
白滋賀	0.44	-0.50	2.13	2.45	3.69	2.53	3.97	2.82
長瀬	-1.38	-0.05	-0.20	3.22	4.73	2.81	4.14	3.12
ごまぞう	0.01	-0.22	-0.04	0.15	5.55	3.80	6.36	4.22
Korea39	0.09	-0.17	0.04	-0.73	-0.16	2.89	6.52	3.41
H65	0.29	-0.09	-0.08	-0.22	0.30	0.49	6.56	5.02
優性度平均	-0.14	-0.22	-0.06	-0.41	0.01	-0.08	0.12	
セサモリン								
親系統	真瀬金	岩手黒	白滋賀	長瀬	ごまぞう	Korea39	H65	平均
真瀬金	2.56	1.27	2.58	2.24	3.16	2.38	3.03	2.44
岩手黒	-0.42	1.14	1.08	1.30	1.79	1.45	2.35	1.54
白滋賀	-0.35	-0.53	2.69	2.41	3.49	2.45	2.67	2.45
長瀬	-0.43	-0.35	-0.08	2.21	2.01	2.34	2.78	2.18
ごまぞう	-0.08	-0.27	0.11	-0.61	3.99	2.95	4.07	2.91
Korea39	0.03	-0.20	0.03	3.75	-0.07	2.17	3.56	2.52
H65	-0.07	-0.02	-0.52	-0.10	0.73	0.44	3.65	3.08
優性度平均	-0.22	-0.30	-0.22	0.36	-0.03	0.66	0.08	

$F_2$  植物:  $F_3$  種子. 表中, 対角線の枠内は親系統の含量, 対角線の上側は  $F_2$  の含量, 対角線の下側は  $F_2$  の優性度. 優性度 =  $F_2$  値 - (両親の平均値) / 両親間差の絶対値.

第6表 異なる花粉親により交配したゴマ  $F_1$  種子のリグナン含量 (2015).

セサミン (mg/g)							
種子親	花粉親						
	真瀬金	岩手黒	白滋賀	長瀬	ごまぞう	Korea39	H65
真瀬金	3.14	3.20	2.77	3.02	2.82	2.73	3.33
岩手黒	0.54	0.53			0.16	0.04	0.33
白滋賀	0.92	1.03	1.73	0.97	1.11	0.80	
長瀬		2.68	1.97	2.77	2.18	1.51	
ごまぞう	5.55	4.77	6.69	4.47	6.69	5.24	5.89
Korea39						2.51	
H65							5.93
セサモリン (mg/g)							
種子親	花粉親						
	真瀬金	岩手黒	白滋賀	長瀬	ごまぞう	Korea39	H65
真瀬金	2.38	2.54	2.20	2.63	2.57	2.46	2.80
岩手黒	0.70	1.03			0.63	0.36	0.80
白滋賀	2.36	2.95	2.65	2.38	2.26	2.22	
長瀬		2.07	1.61	1.99		1.55	
ごまぞう	3.60	3.47	4.05	3.49	4.09	3.76	4.03
Korea39						2.03	
H65							3.46

種子親に稔実した  $F_1$  種子のリグナン含量, 但し対角線上の枠内は自殖種子のリグナン含量. 温室内で採種したサンプルを分析. 空欄は稔実不良により分析不能の組み合わせ. 各組み合わせ 2~3 交配の平均値.

は無いと推定できた ( $Vr/Wr$  グラフ省略). 次に, 両含量に関する Walters and Morton (1978) による分散分析結果を第3表に示す.  $F_2$  の両含量は,  $F_1$  と同じく  $a$  項,  $b$  項ともに統計的に有意となった. 両含量の各種遺伝パラメーター (第4表) では, 両含量ともに相加分散が優性分散を上回り, 平均優性度が1未満の部分優性であり優性効果の方向とともに  $F_1$  の結果に一致した. 狭義の遺伝率はセサミン含量が0.903, セサモリン含量が0.859 いずれも高かった.

### 3. $F_1$ 種子におけるセサミンおよびセサモリン含量 (2015)

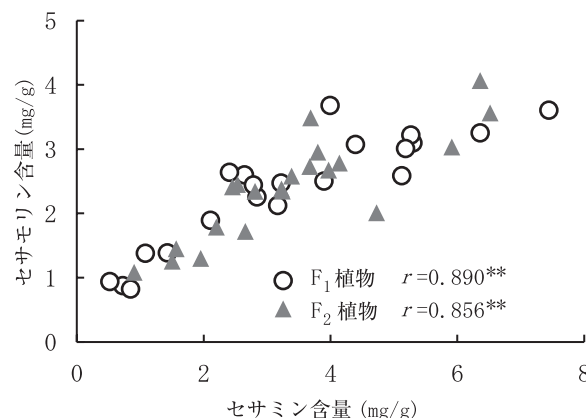
人為受粉のため, 開花期の不適合, 低温による花粉の発育不全などから一部の組み合わせにおいて  $F_1$  種子が十分に採種できず, それらについてはセサミンおよびセサモリン含量を分析できなかった (第6表). 多くの組み合わせにおいて  $F_1$  種子のセサミンおよびセサモリン含量は, 概して種子親系統が自殖した種子のそれぞれの含量に類似していた. 「白滋賀」を種子親とした  $F_1$  種子は自殖種子よりも低い傾向を示したが, 高含量の「ごまぞう」を花粉親とした場合も低かった. これらのことから受粉当代の  $F_1$  種子のセサミンおよびセサモリン含量は花粉親の影響を受けず, 専ら種子親の遺伝子型に依存していることが認められた.

## 考 察

本試験の結果, セサミンおよびセサモリン含量は, 優性度の絶対値が概して1を下回り平均優性度も0.58から0.88を示したため, 部分優性であると考えられた. 優性効果は,  $(Vr+Wr)/Pr$  が正の相関を示したことおよび平均優性度の方向が負となったことから, 含量の少ない方が優性と考えられ, 正の優性度を示す組み合わせもあったことから, 優性効果は小さいと考えられた. 狭義の遺伝率は0.85以上を示して高く, また, いずれの試験でも相加分散が優性分散を上回っていることから, セサミンおよびセサモリン含量は, 表現型に基づいた選抜育種や交配後代における含量の推定が容易であると考えられた.

勝田ら (2005) の調査では, ゴマ遺伝資源 650 点のセサミン含量は0.1 mg/gから9.0 mg/g, セサモリン含量は0.1 mg/gから3.5 mg/gの範囲に分布しており, 本試験の供試材料と比較すると最大値はほぼ同じであった. しかし, 最小値では本供試材料中の「岩手黒」でもセサミンおよびセサモリン含量が1.0 mg/g前後を示していることから, 本実験材料はゴマ遺伝資源のセサミンおよびセサモリン含量の変異を完全にカバーしてはいないと推察される. 勝田ら (2005) および山本ら (2014) は, 分離世代においてセサモリンが極低含量な個体が分離することを報告しており, セサモリン合成には主働遺伝子が存在している可能性がある. それに対して本実験結果では, セサミンおよびセサモリン含量は連続的に分布しており, 両含量での変異はポリジーン系で制御されていることが示唆された.

Beroza (1955) がゴマのリグナン類の構造を明らかにし



第4図 ゴマ片側ダイアレル交配による  $F_1$  および  $F_2$  植物におけるセサミンとセサモリン含量との関係.

各世代  $n=21$ .  $F_1$  植物:  $F_2$  種子,  $F_2$  植物:  $F_3$  種子. \*\*は1%水準で統計的に有意.

て以降, リグナン類の機能性が各種明らかにされてきた. 一方, リグナンの合成経路については, セサミンは酵素反応によってピノレジノールからピペリトールを経て, セサミンとなることが判明しているが (Ono ら 2006), セサモリンの合成は不明のままである. セサモリンは, セサミンのフェニル基にアセタール酸素架橋を1箇所持つ点だけが異なっており (Beonza 1955), セサミンの酵素的転換により合成されることが類推されている. ここで本試験の  $F_1$  および  $F_2$  の結果を用いてセサミン含量とセサモリン含量との間の相関を解析すると, 相関係数は  $F_1$ ,  $F_2$  それぞれで0.890, 0.856と統計的に1%水準 ( $n=21$ ) で有意な正の相関関係が認められた (第4図). この事に加えて, 本実験のセサミンおよびセサモリン含量のダイアレル分析の結果から, 両含量はともに相加効果が優性効果を上回ること, 優性効果が負であること,  $Vr/Wr$  のグラフ上の親系統の分布が類似していること等, 両形質の遺伝性は類似点が多く, 両成分含量の多少は同じポリジーン系で制御されていると考えられる. このため高リグナン品種開発では, 両形質ともに含量が高い方が望ましいため, 選抜育種は効率的に行えると考えられる.

ゴマの収量構成要素についてダイアレル分析から推定した狭義の遺伝率について, Kamala (1999) は, 成熟期が0.82, 個体当たり種子量が0.66, また, 大潟・加藤 (2014) は, 一次分枝数が0.81, 成熟期が0.78であったことを報告している. これらの遺伝率と比較すると, ゴマのセサミンおよびセサモリン含量の遺伝率は高い. 狭義の遺伝率が高いことは,  $F_2$  や  $F_3$  といった比較的初期分離世代においても, 表現型に基づいた選抜が有効であることを示している.

本試験では,  $F_1$  種子におけるセサミンおよびセサモリン含量がともに種子親側の値に近く, 両親の中間的な値ではなかった. このため本試験において  $F_1$  植物上の  $F_2$  種子, および  $F_2$  植物上の  $F_3$  種子を対象とした, それぞれの結果を  $F_1$  および  $F_2$  世代のダイアレル分析に供したことは妥当

であったと考えられる。一方、ゴマ種子組織は子葉が62%、内胚乳が26%で構成され(田代ら2004)、セサミンおよびセサモリンは、子葉と内胚乳のそれぞれに蓄積されることが報告されている(田代・野村2004)。ゴマの内胚乳については不明な点が多く、また、子葉と内胚乳では核相が異なることから、ゴマ種子組織の発生とセサミンおよびセサモリンの蓄積についてより詳細に分析する必要がある。また、本実験は片側ダイアレル分析であったため、細胞質遺伝の影響を明らかにできず、今後、細胞質遺伝についても検討する必要がある。

### 引用文献

- Beronza, M. 1955. The structure of sesamol and its stereochemical relationship to sesamin, asarinin and pinoresinol. J. Am. Chem. Soc. 77: 3332-3334.
- 大豆供給安定協会 1991. 付表 6, 海外原料供給動向等基本調査(ゴマ)委託事業報告書: 360-361.
- Ide, T., Lim, J.S., Odbayar, T. and Nakashima, Y. 2009. Comparative study of sesame lignans (sesamin, episesamin and sesamol) affecting gene expression profile and fatty acid oxidation in rat liver. J. Nutr. Sci. Vitaminol. 55: 31-43.
- Kamala, T. 1999. Gene action for seed yield components in sesame (*Sesamum indicum*). Indian J. Agric. Sci. 69: 773-774.
- 勝田真澄・安本知子・山田哲也 2005. ゴマにおけるセサミンおよびセサモリン含有量の変異と遺伝. 育種学研究 7 (別 1・2): 257.
- 小林貞作 (1977). ゴマ. 生物の科学 遺伝 5月号: 54-64.
- Nair, G.G. and Nair, C.K. 2010. Protection of cellular DNA and membrane from  $\gamma$ -radiation-induced damages and enhancement in DNA repair by sesamol. Cancer Biother. Radiopharm. 25: 629-635.
- Nakai, M., Harada, M., Nakahara, K., Akimoto, K., Shibata, H., Miki, W. and Kiso, Y. 2003. Novel antioxidative metabolites in rat liver with ingested sesamin. J. Agric. Food Chem. 51: 1666-1670.
- 並木満夫・福田靖子・田代亨編 2015. 4-1 ゴマの栄養機能. ゴマの機能と科学. 朝倉書店, 70-72.
- 大淵直樹・加藤晶子 2014. ゴマの収量構成要素に関するダイアレル分析. 日作紀 84 (別 1): 72.
- Ono, E., Nakai, M., Fukui, Y., Tomimori, N., Fukuchi-Mizutani, M., Saito, M., Satake, H., Tanaka, T., Katsuta, M., Umezawa, T. and Tanaka, Y. 2006. Formation of two methylenedioxy bridges by a Sesamum CYP81Q protein yielding a furofuran lignan, (+)-sesamin. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 103: 10116-10121.
- Shirato-Yasumoto, S., Komeichi, M., Okuyama, Y. and Horigane, A. 2003. A simplified HPLC quantification of sesamin and sesamol in sesame seed. SABRAO J. Breed. Genet. 35: 27-34.
- 田代亨・鈴木貴之・井上恵 2004. ゴマ種子の無機成分の局在性について. 日作紀 73 (別 1): 110-111.
- 田代亨・野村朋史 2004. ゴマ種子のゴマリグナン類の局在性について. 日作紀 73 (別 2): 18-19.
- 鵜飼保雄 1989. 量的形質のダイアレル分析のためのパソコン用プログラム DIALL の作成. 育種 39: 107-109.
- Walters, D.E. and Morton, J.R. 1978. On the analysis of variance of a half diallel table. Biometrics 34: 91-94.
- 山本将之・鎧塚清吾・後藤望・増田恭次郎・若杉達也・山田恭司 2014. ゴマ種子中のリグナン含量の遺伝様式. 育種学研究 16 (別 2): 169.
- 安本知子 2008. ゴマ種子のセサミン・セサモリン含有量の変動要因解析と高含量品種の育成および脂質代謝における機能性評価. 作物研報 9: 27-62.

**Half-Diallel Analysis for Sesamin and Sesamol Contents of Sesame (*Sesamum indicum* L.) Seeds** : Naoki OGATA and Masako KATO (*Inst. of Crop Sci., NARO, Tsukuba 305-8518, Japan*)

**Abstract** : The promotion of domestic sesame requires the development of sesame varieties with a high lignan content, which inevitably necessitates the elucidation of the genetic factors affecting sesamin and sesamol contents. Therefore, in this experiment, the  $F_1$  and  $F_2$  plants of seven genetic resources crossed in the half-diallel manner were cultivated in the field, and the sesamin and sesamol contents of their seeds were analyzed. Based on the  $V_r/W_r$  graph, the results fit an additive-dominant model without the influence of epistasis. The additive variance exceeded the dominance variance in both contents—the average degree of dominance was 0.58–0.88. Most of the dominance effects reduced these contents. The narrow sense heritability was 0.859–0.903, which was higher than that estimated from the other traits of sesame. Since no major differences were observed between the  $F_1$  and  $F_2$  plants in the sesamin and sesamol contents, and a statistically significant positive correlation was observed between the sesamin and sesamol contents in each generation, the contents of both sesamin and sesamol would be controlled by a common polygenic system. The seed parents artificially pollinated with other pollen parents had sesamin and sesamol contents similar to the self-pollinated seeds. These results clearly showed that selection based on the phenotype in early generations should be effective for breeding higher contents of sesamin and sesamol.

**Key words** : Additive variance, Diallel analysis, Dominance variance, Heritability, Sesame, Sesamin, Sesamol.